

УДК 534.1

О КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ (часть 2)

© Георгий Константинович Корендяев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

korenduba@gmail.com

Аннотация. В статье подробно описываются методики конечноэлементного моделирования процесса обработки металлов резанием. Методики раскрываются на примере прямоугольного свободного резания и могут быть распространены на подавляющее большинство известных способов металлообработки (точение, протягивание, частные случаи фрезерования, сверления, развертывания и многие другие). Приводятся основные известные математические модели процессов деформирования, разрушения, трения и теплопроводности, используемые при КЭ - моделировании процесса резания.

Ключевые слова. Прямоугольное свободное резание металлов, конечноэлементное моделирование, математическая модель, пластическая деформация, разрушение, термомеханическая модель, автоколебания.

On the finite-element modeling of the process of metal cutting.

© G.K. Korendyasev

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article describes in detail the methods in finite element simulation of metal cutting. Methods are described by the example of the rectangular free-cutting and can be extended to the vast majority of known methods metalworking (turning, broaching, milling, drilling and many others). Describes the main known mathematical model of the processes of deformation, fracture, friction and thermal conductivity used in the FE – simulation.

Keywords. rectangular free cutting of metals, finite-element modeling, mathematical model, plastic deformation, fracture, thermomechanical model, chatter.

1. Общий алгоритм моделирования процесса резания как взаимосвязанного термомеханического процесса приведен на рис. 1.

Общий алгоритм решения термомеханической задачи.



Рис.1. Общий алгоритм решения взаимосвязанной термомеханической задачи.

Работа алгоритма начинается с введения исходных данных, в которых отображается информация о геометрии системы, механических и теплофизических свойств материалов, начальные и граничные условия, нагрузки и параметры решателя. После введения и анализа входных данных выполняется инициализация массивов напряжений, деформаций, перемещений, скоростей, ускорений и других внутренних переменных. После этого начинается основной цикл расчета:

1. Налагаются граничные условия для механической и термодинамической задач.
2. Происходит расчет теплового поля путем интегрирования уравнения теплопроводности.
3. Выполняется вычисление напряжений в точках интегрирования конечных элементов. Проводится проверка элементов на соответствие критериям разрушения. При необходимости элементы удаляются с сетки.
4. Происходит идентификация узлов, находящихся на границе контакта, определяются нормальные силы в узлах и вычисляются касательные силы с использованием выбранной модели трения.
5. Вычисляются ускорения и налагаются кинематические граничные условия.
6. Происходит сохранение результатов.
7. Выполняется вычисление скоростей по известным ускорениям.
8. Выполняется вычисление перемещений и обновление геометрии. При необходимости перестраивается конечноэлементная сетка.
9. Вычисляется длительность следующего шага интегрирования механической задачи и производится проверка условий завершения работы алгоритма.

Следует отметить, что необходимый шаг интегрирования уравнения теплопроводности (решение тепловой задачи) в 10-100 раз больше, чем уравнения движения

(решение механической задачи). Поэтому обновление температурного поля происходит значительно реже, чем полей механических показателей.

Практическая реализация данной методики возможна с помощью ряда систем инженерного анализа: *Ansys/LS-DYNA*, *Abaqus*, *Deform 3D*.

2. В качестве практического примера реализации данной методики приведем задачу моделирования возбуждения термомеханических автоколебаний при обработке металлов резанием.

Эффект термомеханических автоколебаний возникает вследствие локального изменения механических характеристик обрабатываемого материала в зоне первичного сдвига, в первую очередь предела прочности, с ростом температуры резания. Тепловые и механические процессы, протекающие при резании, неразрывно связаны друг с другом. Механические процессы, происходящие в зоне резания, приводят к интенсивному тепловыделению, что в свою очередь вызывает значительный рост температуры обрабатываемого изделия и инструмента. При колебаниях температуры, в зоне резания происходят структурные превращения, и как следствие, изменение механических свойств материала. Характер зависимости между механическими и тепловыми составляющими процесса резания позволяет предположить возможность появления в системе «резец-заготовка» термомеханических автоколебаний. Для большинства металлов, обрабатываемых резанием, характерна падающая зависимость механических характеристик от температуры. Сила резания непосредственно зависит от предела прочности обрабатываемого материала и в первом приближении оказывается пропорциональной ему. Следовательно, зависимость «сила резания – температура» также имеет отрицательный угол наклона, что определяет потенциальную неустойчивость системы, и, как следствие, возможность возникновения в ней незатухающих автоколебаний. Математическая модель термомеханических автоколебаний изложена в работе [21].

Задача решалась в двумерной постановке с помощью программы *abaqus explicit (student edition)* с использованием явного метода интегрирования уравнений динамики.

Исходными данными для моделирования являются:

- а) модели материалов заготовки и инструмента;
- б) модель трения между поверхностями инструмента и заготовки;
- в) модель стружкоотделения;
- г) геометрия инструмента и заготовки.

При моделировании использовалась идеальная упруго-пластическая модель обрабатываемого материала. Данные по зависимости модуля упругости и предела текучести обрабатываемого материала от температуры заимствованы из источников [22,23]. В качестве материала заготовки выбрана сталь AISI 1045. Необходимые для моделирования свойства этой стали в зависимости от температуры приведены в табл.1.

Инструмент предполагается абсолютно жестким, поэтому его материал описывался лишь термодинамическими параметрами и плотностью. В качестве инструментального материала был выбран твердый сплав H10F, обладающий следующими свойствами: плотность $\rho=14500$ кг/м³; коэффициент линейного теплового расширения $\alpha=5,4 \cdot 10^{-6}$; теплоемкость $C_p=400$ Дж/(кг⁰С); теплопроводность $H=50$ Вт/(м⁰К).

Таблица 1.

Температура T , °С	20	200	400	600	1800
Модуль упругости E , ГПа	215	210	165	160	0
Коэффициент Пуассона, ν	0,3				–
Предел текучести σ_T , МПа	400	340	300	160	0
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг °С)	461				
Теплопроводность H , Вт/(м °К)	23	23,5	25,5	26,5	30
Плотность ρ , кг/м ³	7750				

Коэффициент линейного теплового расширения $10^5 \alpha$	1,2
--	-----

Была принята кулоновская модель трения: $\tau = \mu \sigma \operatorname{sgn} \dot{u}$, где τ – напряжение сдвига в контакте, σ – нормальное напряжение в контакте, μ – коэффициент кулоновского трения. На основании обзора литературы, который здесь не приводится, значение коэффициента трения на контактных площадках «инструмент – стружка» и «инструмент – заготовка» было выбрано $\mu=0.2$.

В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку.

При моделировании приняты следующие геометрические параметры процесса, инструмента и заготовки: глубина резания 2 мм; ширина среза 3 мм; передний угол инструмента 10° ; задний угол инструмента 5° .

В модели использованы 4-х узловые элементы CPE4RT с использованием опции «*distortion control*» для сохранения качества сетки при значительных пластических деформациях материала заготовки. Сетка уплотнялась вблизи зон ожидаемого высокого градиента напряжений, деформаций и температур. Размер сетки выбирался таким образом, что бы с одной стороны обеспечить достаточную точность расчета, а с другой стороны приемлемую размерность задачи.

Граничные условия модели приведены на рисунке 2. Заготовка движется с постоянной скоростью $V_{рез.}$ навстречу инструменту. Инструмент с массой m соединен с неподвижным основанием упруго-диссипативной связью с коэффициентами жесткости c и вязкого сопротивления b и имеет возможность перемещения только вдоль оси X . Начальные условия: заданная температура системы и начальная скорость заготовки, равная постоянной составляющей скорости резания.

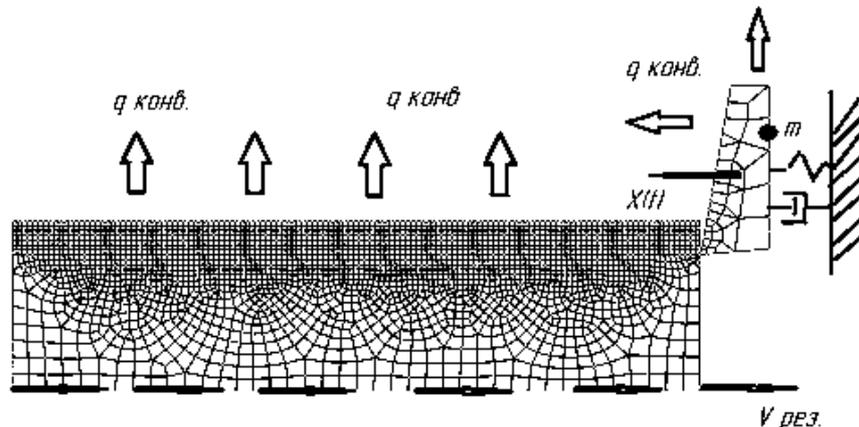


Рис.2. Граничные условия модели.

Максимальный шаг интегрирования равен $\Delta t_{\max} = \min(L/c)$; где L – характерный размер конечного элемента, $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость продольной волны в материале изделия.

Результаты моделирования показали возможность возбуждения термомеханических автоколебаний. При определенных соотношениях механических и тепловых параметров обрабатываемого материала происходит самовозбуждение автоколебаний и их переход к установившимся периодическим режимам. На рис. 3 показан график изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при

врезании инструмента в материал. Видно, что в начале резания процесс сопровождается быстрым разогревом материала, и при температуре $\Theta \approx 200^\circ$ происходит самовозбуждение автоколебаний, а затем и дальнейший переход к установившемуся режиму автоколебаний, сопровождающийся возрастанием как средней за цикл температуры, так и амплитуды ее циклического изменения.

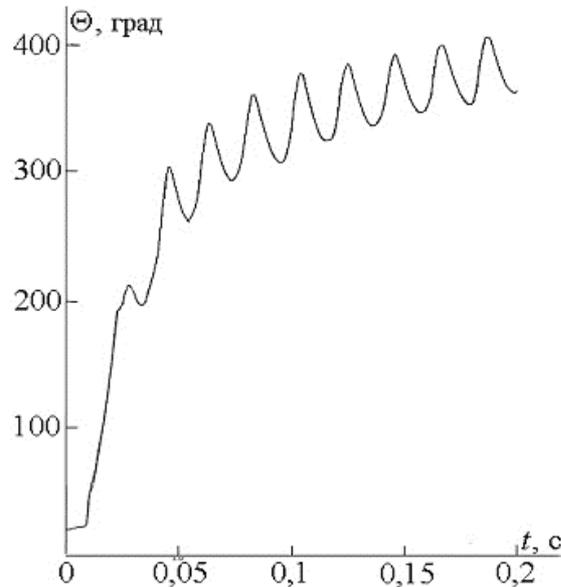


Рис. 3. График изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал.

Анализ зависимости контактной температуры от времени показывает, что изменение температуры на контактной площадке за один период установившихся колебаний составляет $50^\circ - 60^\circ \text{C}$, а в зоне сдвига до 100°C , что при средней температуре в зоне резания равной примерно 500°C обеспечивает изменение предела текучести в области сдвига на 10-15 мПа. Эти данные дают представление о том, насколько мощным источником возбуждения автоколебаний является разупрочнение материала заготовки при повышении температуры в зоне резания.

Следует отметить, что столь значительные колебания температуры происходят в достаточно малом объеме. На рис. 4 приведены картины распределения температур в зоне резания в двух фазах колебаний резца в установившемся режиме в моменты достижения температурой максимального (рис.4,а) и минимального (рис.4,б) значений. На рис.4,а отчетливо видна локальная область высокой температуры в первичной зоне сдвига при формировании стружки. Именно предположение о подобной локализации и наличии границы резкого перепада температур этой области с окружающей средой являлось одним из основных допущений, принятых при построении математической модели [21].

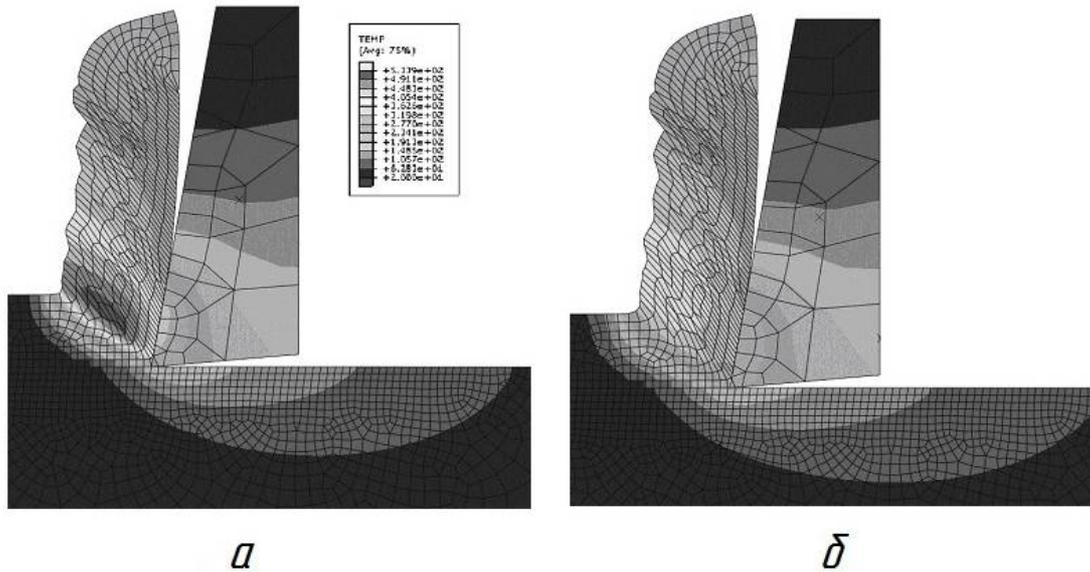


Рис.4. Распределение температур в зоне резания в противоположных фазах колебания.

В ходе моделирования были получены графики (рис.5) изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени: 1 – смещение резца; 2 – относительная скорость резца и заготовки; 3 – сила резания; 4 – средняя температура в контакте резца и стружки. Для наглядности представленные кривые показаны в нормированном виде.

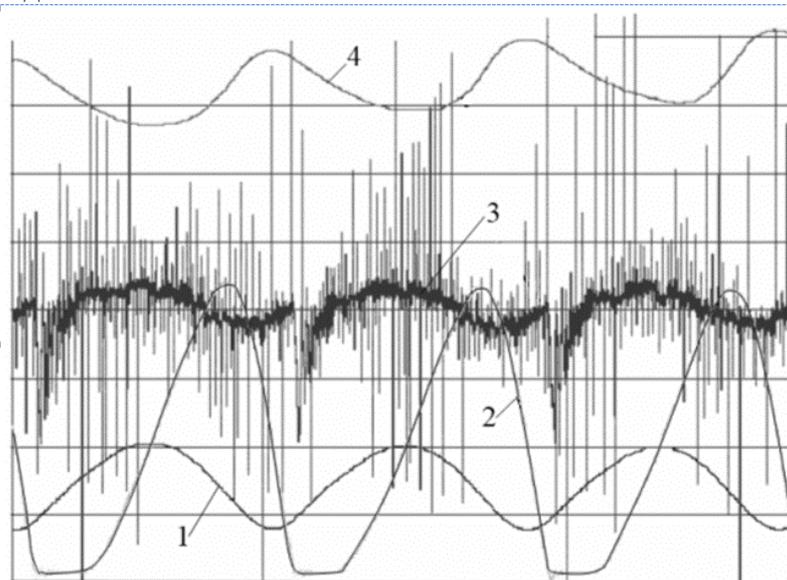


Рис.5. Графики изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени.

Колебания резца происходят с частотой собственных колебаний упругой системы по закону, близкому к гармоническому (кривая 1). Однако относительная скорость резца имеет участок, где эта скорость равна нулю, т.е. резец неподвижен относительно заготовки и его скорость в абсолютном движении равна скорости изделия. Во время совместного движения энергия от привода заготовки запасается упругой системой резца, а затем, когда сила пружины оказывается достаточной для преодоления сопротивления резания, начинается

встречное движение резца. Из сопоставления графика относительной скорости с графиком изменения температуры (кривая 4) видно, что при попутном движении и относительном останове температура в зоне резания уменьшается, при встречном движении возрастает. Именно такое изменение температур и создает условия возникновения и поддержания автоколебаний.

Особое внимание следует уделить графику зависимости силы резания от времени (кривая 3). Сила резания в среднем отслеживает изменение температуры, однако ее график содержит характерные провалы силы резания на границе перехода к участку относительного останова инструмента. Этот провал объясняется прохождением участка между разгрузкой и нагружением упругой связи. Дополнительные наложенные высокочастотные составляющие являются следствием дискретности элементов модели в зоне образования стружки. При достижении критической деформации происходит разрушение элемента, которое приводит к мгновенному изменению напряжений в указанной зоне, вызывающему высокочастотные колебания. Верность этого предположения подтверждается тем, что частота данных высокочастотных колебаний приблизительно равна частоте разрушений конечных элементов на контактной линии. Некоторый вклад в общую картину колебаний силы резания вносят и упругие колебания стружки.

Было проведено сравнение сил резания для обработки в условиях наличия и отсутствия автоколебаний. Предотвращение автоколебаний в системе достигалось путем фиксации инструмента. Графики изменения сил резания в переходном процессе врезания инструмента в заготовку приведены на рисунке 6. На рисунке 6 $F_{рез.}(rigid)$ – сила резания, возникающая в системе с зафиксированным инструментом; $F_{рез.}(spring)$ – сила резания, возникающая в системе при самовозбуждении автоколебаний инструмента. Как видно из рисунка 6. установившееся значение силы резания при зафиксированном инструменте приблизительно равно среднему значению силы резания в процессе развития автоколебаний.

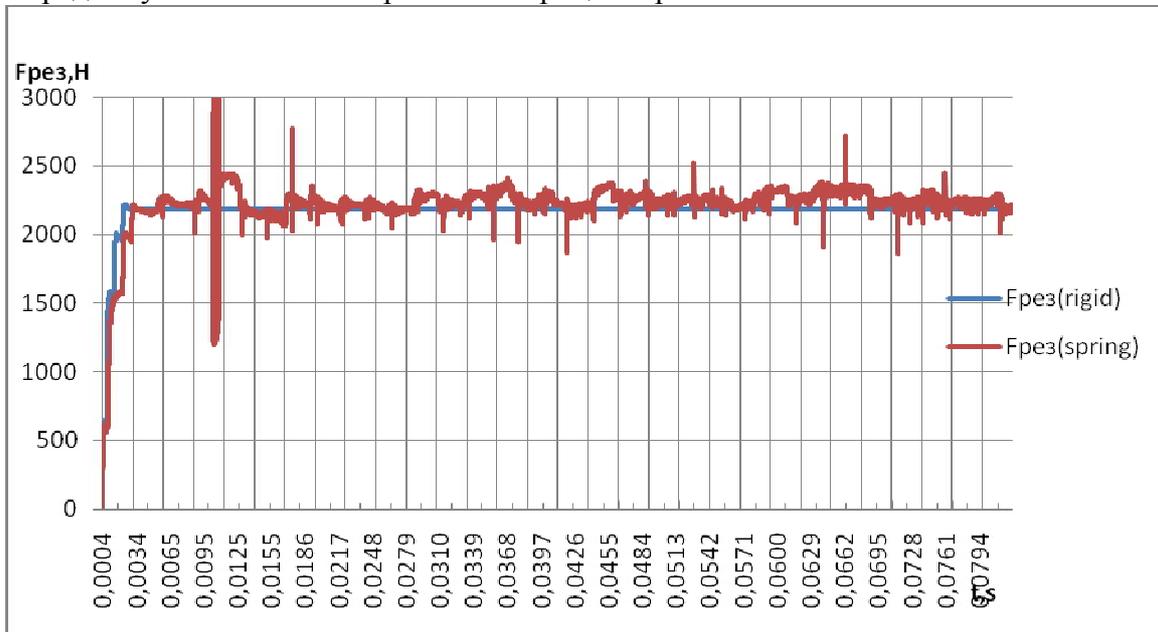


Рис.6. Графики зависимости силы резания от времени для жесткой системы и упругой системы в условиях развития автоколебаний.

Автоколебания весьма существенно влияют на форму стружки. Стружка приобретает специфическую волнообразную форму. Области значительных пластических деформаций, соответствующие движению резца навстречу заготовке, чередуются с относительно менее

наклепанными зонами, соответствующими движению резца от заготовки. Число волн наклепа на стружке соответствует числу колебаний.

На рисунке 7 приведены для сравнения эпюры распределения эквивалентных пластических деформаций в стружке при резания в условиях наличия (рис.7,а) и отсутствия (рис.7,б) автоколебаний.

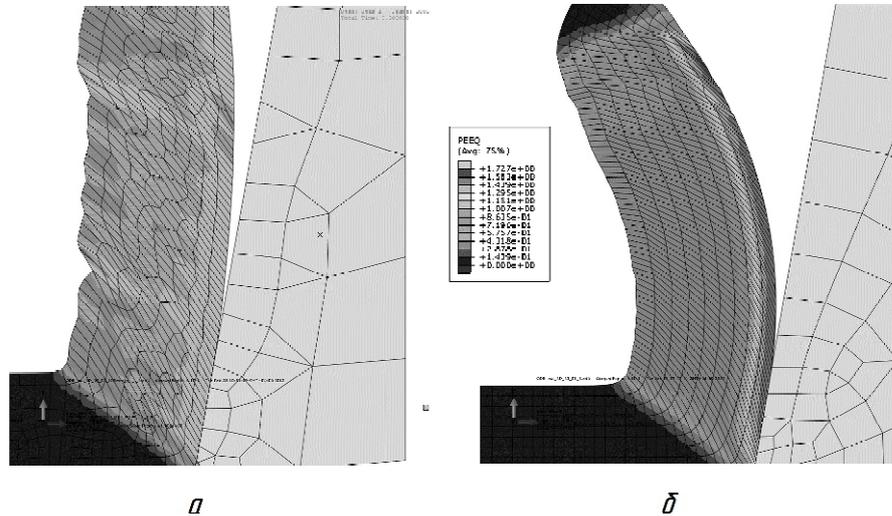


Рис.7. Влияние автоколебаний на форму стружки.

Для оценки влияния скорости резания на характер автоколебательного процесса была проведена серия численных экспериментов. Скорость резания варьировалась от 0,05 до 3 м/с. По результатам экспериментов построен график зависимости амплитуды автоколебаний от скорости резания (рис.8).

Видно, что данный график имеет экстремальный характер, что согласуется с экспериментальными данными [24].

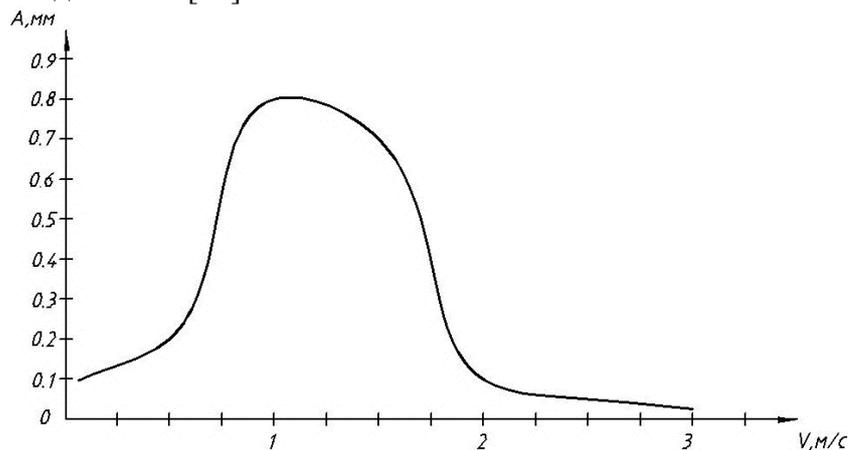


Рис.8. Зависимость амплитуды автоколебаний от скорости резания.

Ниже приведены результаты анализа влияния свойств обрабатываемого материала на характер автоколебательного процесса. Проводилось сравнение поведения автоколебательной системы при обработке стали, меди и алюминия. Механические и термодинамические свойства этих материалов при различных температурах приведены в таблицах 1,2 и 3 соответственно.

Таблица 2 . Свойства меди.

Температура T , °С	20	50	100	200	300	400	500
Модуль упругости E , ГПа	120	125	125	110	82	50	35
Коэффициент Пуассона ν	0.35						
Предел текучести σ_T , МПа	300	310	312	270	205	130	85
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг °С)	400						
Теплопроводность H , Вт/(м °К)	210						
Плотность ρ , кг/м ³	9000						
Коэффициент линейного теплового расширения $10^5\alpha$	5						

Таблица 3. Свойства алюминия.

Температура T , °С	20	50	100	200	300
Модуль упругости E , ГПа	69	67	65	60	50
Коэффициент Пуассона ν	0.34				
Предел текучести σ_T , МПа	103	100	97	90	75
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг °С)	920				
Теплопроводность H , Вт/(м °К)	385				
Плотность ρ , кг/м ³	2700				
Коэффициент линейного теплового расширения $10^5\alpha$	5				

Наиболее важным отличием данных материалов, с точки зрения влияния на вибрации при их обработке, является различие в значениях модуля упругости E и предела текучести σ_T , определяющее величину силы резания. Так при обработке стали при заданной геометрии системы и свойствах инструментального и обрабатываемого материалов средняя величина силы резания P_z оказывается равной 2500Н, меди – 1900Н, алюминия - 700Н. Очевидно, что при заданной жесткости обрабатывающего инструмента, его деформации существенно различаются при обработке материалов, имеющих столь разные значения σ_T . Выбранные нами материалы имеют ярко выраженную падающую характеристику $\sigma_T = \sigma_T(T)$ необходимую для возбуждения автоколебаний. Моделирование показывает, что автоколебания могут возбуждаться для всех этих материалов в широком диапазоне скоростей резания. Амплитуда этих автоколебаний имеет максимальное значение при обработке стали, а минимальное значение – при обработке алюминия. В таблице 4 приведены максимальные значения A_{\max} амплитуды автоколебаний, возникающих при обработке выбранных материалов. Моделирование проводилось при одинаковой геометрии резания.

Таблица 4

материал	сталь	медь	алюминий
A_{\max} , мм	0.8	0.5	0.2

Интерес представляет сравнение теплового поля, возникающего при обработке различных материалов в условиях термомеханических автоколебаний (рис.9 а, б, в).

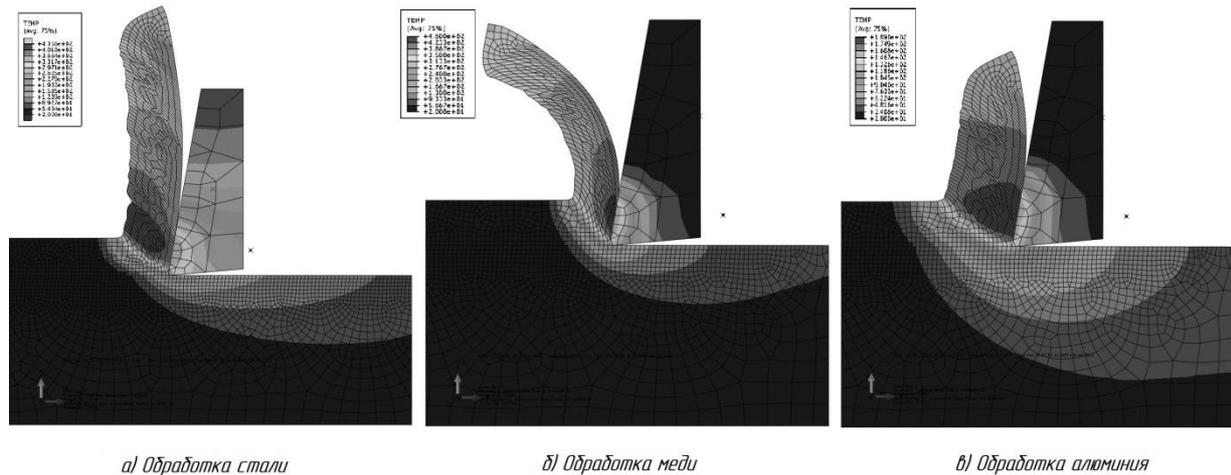


Рис.9. Тепловое поле в зоне резания, возникающее при обработке различных материалов.

Причиной столь разного характера распределения температур является различие термодинамических параметров выбранных материалов, в первую очередь теплопроводностей. Как видно из рисунка, наибольший прогрев заготовки наблюдается при обработке алюминия, обладающего весьма высокой теплопроводностью. Наименьший прогрев заготовки соответствует обработке стали, имеющей низкий коэффициент теплопроводности.

Понижение теплоемкости, так же как и повышение теплопроводности улучшает условия теплоотвода из зоны резания. При движении резца от заготовки в процессе установившихся автоколебаний, область сдвига успевает остыть. Это создает благоприятные условия для поддержания автоколебаний. Однако, как уже говорилось выше, решающим фактором, определяющим виброустойчивость системы при обработке заданного материала, оказываются значения предела текучести σ_T и модуля упругости E и их зависимость от температуры.

В заключении отметим, что при решении задачи о возбуждении термомеханических автоколебаний, конечноэлементное моделирование играло роль связки между теорией и экспериментом. Сама по себе математическая модель может дать лишь качественное представление о физике автоколебаний при резании, тогда как в эксперименте подобные «тонкие эффекты» достаточно непросто зафиксировать. Конечноэлементное моделирование позволяет визуализировать картины распределения тепловых и механических полей в системе, давая более ясное, чем математическая модель, понимание процесса, а также получить близкие к реальным режимы возбуждения автоколебаний, которые затем можно использовать в качестве исходных данных для эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты №13-08-01235 А и № 13-08-90419 Укр_ф_а.

Список литературы.

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике — М.: Мир, 1975.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979.—392 с.
3. Армарего И.Д., Браун Р.С. Обработка металлов резанием. М.: Машиностроение, 1977. 325с.
4. Бобров Б. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975.—344 с

5. Бобров Б.Ф. и др. Развитие науки о резании металлов. Под редакцией Н.Н.Зорева. М.: Машиностроение, 1967.
6. Клушин М.И. Резание металлов: в 3 ч. Горький: ГПИ, 1965.
7. Ящерицын П.И. Теория резания. Мн.: Новое знание. 2005. 512 с.
8. Виноградов Ю.В. Моделирование процесса резания методом конечных элементов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тула, 2004 г.
9. Криворучко Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник/ Д. В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач.- Суми: Вид-во СумДУ, 2009. –208 с.
10. Kalhori. Modelling and Simulation of Mechanical Cutting. Doctoral thesis. Lulea University of Technology. Sweden. 2001. 103 с.
11. Belytschko Ted, Wing Kam Liu, Brian Moran. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2000. 667p.
12. Komvopoulos, K. and Erpenbeck, S.A.. Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting. Trans. ASME J. Eng. Ind. 1991. 113: 253-267.
13. Oxley, P.L.B. Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability. Journal of Applied Mechanics, volume 57, 1990.
14. Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1979. –168 с.
15. G.R. Johnson, W.H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983, pp. 541-547.
16. Oxley, P.L.B., 1989, Mechanics of Machining, An Analytical Approach to Assessing Machinability, Halsted Press, John Wiley & Sons Limited, New York, 1989.
17. Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W.. Dislocation Mechanics Based Constitutive Relations for Materials Dynamics Calculations. Journal of Applied Physics 61(5): 1987.
18. Özel, T., and Zeren, E., 2004, "Determination of Work Material Flow Stress and Friction Properties for FEA of Machining Using Orthogonal Cutting Tests," Journal of Materials Processing Technology, 153-154C 1019-1025.
19. Özel, T. and Zeren, E. (2005) "Finite Element Modeling of Stresses Induced by High Speed Machining with Round Edge Cutting Tools," Proceedings of IMECE'05, 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Paper No. 81046, Orlando, Florida, November 5-11.
20. T. Özel and T. Altan, Determination of Workpiece Flow Stress and Friction at the Chip-Tool Contact for High-Speed Cutting, Inter. J. Mach. Tools Manuf., vol. 40, no. 1, pp. 133–152, 2000.
21. Асташев В.К., Корендясев Г.К. Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании. М. Проблемы машиностроения и надежности машин №3, 2012.
22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
23. Kesharwani R. High temperature behavior of copper. thesis for the Degree of Master of Science. National Institute of Technology Rourkela-769008, Orissa, India, 2010.
24. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1987. 184 с.